

光學系統設計 (Zemax 初學手冊)

蔡長青

ISUAL 計畫團隊

國立成功大學物理系

(第一版, 1999 年 7 月 29 日)

內容綱目:

前言

習作一：單鏡片(Singlet)

習作二：雙鏡片

習作三：牛頓望遠鏡

習作四：Schmidt-Cassegrain 和 aspheric corrector

習作五：multi-configuration laser beam expander

習作六：fold mirrors 和 coordinate breaks

習作七：使用 Extra Data Editor, Optimization with Binary Surfaces

前言

整個中華衛星二號「紅色精靈」科學酬載計畫，其量測儀器基本上是個光學儀器。所以光學系統的分析乃至於設計與測試是整個酬載發展重要一環。

這份初學手冊提供初學者使用軟體作光學系統設計練習，整個需要 Zemax 光學系統設計軟體。它基本上是 Zemax 使用手冊中 tutorial 的中文翻譯，由蔡長青同學完成，並在 Zemax E. E. 7.0 上測試過。由於蔡長青同學不在參與「紅色精靈」計畫，所以改由黃曉龍同學接手進行校稿與獨立檢驗，整個內容已在 Zemax E. E. 8.0 版上測試過。我們希望藉此初學手冊(共有七個習作)與後續更多的習作與文件，使團隊成員對光學系統設計有進一步的掌握。(陳志隆註)

[\(回內容綱目\)](#)

習作一：單鏡片(Singlet)

你將學到：啟用 **Zemax**，如何鍵入 wavelength，lens data，產生 ray fan，OPD，spot diagrams，定義 thickness solve 以及 variables，執行簡單光學設計最佳化。

設想你要設計一個 F/4 單鏡片在光軸上使用，其 focal length 為 100mm，在可見光譜下，用 BK7 鏡片來作。

首先叫出 **ZEMAX** 的 lens data editor(LDE)，什麼是 LDE 呢？它是你要的工作場所，譬如你決定要用何種鏡片，幾個鏡片，鏡片的 radius，thickness，大小，位置……等。

然後選取你要的光，在主選單 system 下，圈出 wavelengths，依喜好鍵入你要的波長，同時可選用不同的波長等。現在在第一列鍵入 0.486，以 microns 為單位，此為氫原子的 F-line 光譜。在第二、三列鍵入 0.587 及 0.656，然後在 primary wavelength 上點在 0.486 的位置，primary wavelength 主要是用來計算光學系統在近軸光學近似(paraxial optics，即 first-order optics)下的幾個主要參數，如 focal length，magnification，pupil sizes 等。

再來我們要決定透鏡的孔徑有多大。既然指定要 F/4 的透鏡，所謂的 F/#是什麼呢？F/#就是光由無限遠入射所形成的 effective focal length F 跟 paraxial entrance pupil 的直徑的比值。所以現在我們需要的 aperture 就是 $100/4=25(\text{mm})$ 。於是從 system menu 上選 general data，在 aper value 上鍵入 25，而 aperture type 被 default 為 Entrance Pupil diameter。也就是說，entrance pupil 的大小就是 aperture 的大小。

回到 LDE，可以看到 3 個不同的 surface，依序為 OBJ，STO 及 IMA。OBJ 就是發光物，即光源，STO 即 aperture stop 的意思，STO 不一定是光照過來所遇到的第一個透鏡，你在設計一組光學系統時，STO 可選在任一透鏡上，通常第一面鏡就是 STO，若不是如此，則可在 STO 這一欄上按滑鼠，可前後加入你要的鏡片，於是 STO 就不是落在第一個透鏡上了。而 IMA 就是 imagine plane，即成像平面。回到我們的 singlet，我們需要 4 個面 (surface)，於是在 STO 欄上，選取 insert cifter，就在 STO 後面再插入一個鏡片，編號為 2，通常 OBJ 為 0，STO 為 1，而 IMA 為 3。

再來如何輸入鏡片的材質為 BK7。在 STO 列中的 glass 欄上，直接打上 BK7 即可。又孔徑的大小為 25mm，則第一面鏡合理的 thickness 為 4，也是直接鍵入。再來決定第 1 及第 2 面鏡的曲率半徑，在此分別選為 100 及 -100，凡是圓心在鏡面之右邊為正值，反之為負值。而再令第 2 面鏡的 thickness 為 100。

現在你的輸入資料已大致完畢。你怎麼檢驗你的設計是否達到要求呢？選 analysis 中的 fans，其中的 Ray Aberration，將會把 transverse 的 ray aberration 對 pupil coordinate 作圖。其中 ray aberration 是以 chief ray 為參考點計算的。縱軸為 EY 的，即是在 Y 方個的 aberration，稱作 tangential 或者 YZ plane。同理 X 方向的 aberration 稱為 XZ plane 或 sagittal。

Zemax 主要的目的，就是幫我們矯正 defocus，用 solves 就可以解決這些問題。solves 是一些函數，它的輸入變數為 curvatures，thickness，glasses，semi-diameters，conics，以及相關的 parameters 等。parameters 是用來描述或補足輸入變數 solves 的型式。如 curvature 的型式有 chief ray angle，pick up，Marginal ray normal，chief ray normal，Aplanatic，Element power，concentric with surface 等。而描述 chief ray angle solves 的 parameter 即為 angle，而補足 pick up solves 的 parameters 為 surface，scale factor 兩項，所以 parameters 本身不是 solves，要調整的變數才是 solves 的對象。

在 surface 2 欄中的 thickness 項上點兩下，把 solve type 從 fixed 變成 Marginal Ray height，然後 OK。這項調整會把在透鏡邊緣的光在光軸上的 height 為 0，即 paraxial focus。再次 update ray fan，你可發現 defocus 已經不見了。但這是最佳化設計嗎？再次調整 surface 1 的 radius 項從 fixed 變成 variable，依次把 surface 2 的 radius，及放棄原先的 surface 2 中 thickness 的 Marginal Ray height 也變成 variable。再來我們定義一個 Merit function，什麼是 Merit function 呢？Merit function 就是把你理想的光學要求規格定為一個標準(如此例中 focal length 為 100mm)，然後 **Zemax** 會連續調整你輸入 solves 中的各種 variable，把計算得的值與你訂的標準相減就是 Merit function 值，所以 Merit function 值愈小愈好，挑出最小值時即完成 variable 設定，理想的 Merit function 值為 0。

現在談談如何設 Merit function，**Zemax** 已經 default 一個內建的 merit function，它的功能是把 RMS wavefront error 減至最低，所以先在 editors 中選 Merit function，進入其中的 Tools，再按 Default Merit Function 鍵，再按 ok，即我們選用 default Merit function，這還不夠，我們還要規定給 merit function 一個 focal length 為 100 的限制，因為若不給此限制則 **Zemax** 會發現 focal length 為 時，wavefront aberration 的效果會最好，當然就違反我們的設計要求。所以在 Merit function editor 第 1 列中往後插入一列，即顯示出第 2 列，代表 surface 2，在此列中的 type 項上鍵入 EFL(effective focal length)，同列中的 target 項鍵入 100，weight 項中定為 1。跳出 Merit function editor，在 Tools 中選 optimization 項，按 Automatic 鍵，完畢後跳出來，此時你已完成設計最佳化。重新檢驗 ray fan，這時 maximum aberration 已降至 200 microns。

其他檢驗 optical performance 還可以用 Spot Diagrams 及 OPD 等。從 Analysis 中選 spot diagram 中的 standard，則該 spot 大約為 400 microns 上下左右交錯，與 Airy diffraction disk 比較而言，後者大約為 6 microns 交錯。

而 OPD 為 optical path difference(跟 chief ray 作比較)，亦從 Analysis 中挑選，從 Fans 中的 Optical Path，發現其中的 aberration 大約為 20 waves，大都 focus，並且 spherical，spherochromatism 及 axial color。**Zemax** 另外提供一個決定 first order chromatic aberration 的工具，即 the chromatic focal shift plot，這是把各種光波的 back focal length 跟在 paraxial 上用 primary wavelength 計算出 first order 的 focal length 之間的差異對輸出光波的 wavelength 作圖，圖中可指出各光波在 paraxial focus 上的 variation。從 Analysis 中 Miscellaneous 項的 Chromatic Focal Shift 即可叫出。

[\(回內容綱目\)](#)

●習作二：雙鏡片

你將學到：畫出 layouts 和 field curvature plots,定義 edge thickness solves, field angles 等。

一個雙鏡片是由兩片玻璃組成，通常黏在一起，所以他們有相同的 curvature。藉著不同玻璃的 dispersion 性質，the chromatic aberration 可以矯正到 first order 所以剩下的 chromatic aberration 主要的貢獻為 second order，於是我們可以期待在看 chromatic focal shift plot 圖時，應該呈現出 parabolic curve 的曲線而非一條直線，此乃 second order effect 的結果(當然其中 variation 的 scale 跟 first order 比起來必然小很多，應該下降一個 order)。

跟習作一一樣，我們仍然要設計一個在光軸上成像，focal length 為 100mm 的光學系統，只不過這次我們用兩塊玻璃來設計。

選用 BK7 和 SF1 兩種鏡片，wavelength 和 aperture 如同習作一所設，既然是 doublet，你只要在習作一的 LDE 上再加入一面鏡片即可。所以叫出習作一的 LDE，在 STO 後再插入一個鏡片，標示為 2，或者你也可以在 STO 前在插入一面鏡片標示為 1，然後在該鏡片上的 surface type 上用滑鼠按一下，然後選擇 Make Surface Stop，則此地一面鏡就變成 STO 的位置。在第一、第二面鏡片上的 Glass 項目鍵入 BK7 即 SF1，因為在 BK7 和 SF1 之間並沒有空隙，所以此 doublet 為相黏的二鏡片，如果有空隙則需 5 面鏡因為在 BK7 和 SF1 間需插入另一鏡片，其 glass type 為 air。現在把 STO 旱地二面鏡的 thickness 都 fixed 為 3，僅第 3 面鏡的 thickness 為 100 且設為 variable，既然要最佳化，還是要設 merit function，注意此時 EFFL 需設在第三面鏡上，因為第 3 面鏡是光線在成像前穿過的最後一面鏡，又 EFFL 是以光學系統上的最後一塊鏡片上的 principle plane 的位置起算。其他的 merit function 設定就一切照舊。

既然我們只是依習作一上的設計規範，只不過再加一面 SF1 鏡片而已，所以其他的 merit function 設定就一切照舊。現在執行 optimization，程序如同習作一，在 optimization 結束後，你再叫出 Chromatic Focal Shift 來看看，是否發現 first order 的 chromatic aberration 已經被 reduced，剩下的是 second order chromatic aberration 在主宰，所以圖形呈現出來的是一個 parabolic curve，而且現在 shift 的大小為 74 microns，先前習作一為 1540 microns。

再看其他的 performance 效果，叫出 Ray aberration，此時 maximum transverse ray aberration 已由習作一的 200 microns 降至 20 microns。而且 3 個不同波長通過原點的斜率大約一致，這告訴我們對每個 wavelength 的 relative defocus 為很小。再者，此斜率不為 0(比較習作一 Fig E1-2)，這告訴我們什麼訊息呢？如果斜率為 0，則在 pupil coordinate 原點附近作一些變動則並不產生 aberration 代表 defocus 並不嚴重，而 aberration 產生的主要因素為 spherical aberration。故相對於習作一(比較他們座標的 scale 及通過原點的斜率)，現在 spherical aberration 已較不嚴重(因為 aberration scale 已降很多)，而允許一點點的 defocus 出現，而出現在 rayfan curve 的 S 形狀，是典型的 spherical balanced by defocus 的情況。現在我們已確定得到較好的 performance，但實際上的光學系統長的什麼樣子呢？選擇 Analysis，Layout，2D Layout，除了光學系統的擺設外，你還會看到 3 條分別通過 entrance pupil 的 top，center，bottom 在空間被 trace 出來，他們的波長是一樣的，就是你定的 primary wavelength(在此為 surface 1)。這是 **Zemax** default 的結果。

但是現在還有一個問題，我們憑直覺定出 STO 的 thickness 為 3，但是真正在作鏡片的時候，STO 和 surface 2 鏡面會不會互相交錯穿出，即在 edge 的 thickness 值為正數或負數，還有是不是應該改一下設計使 lens 的 aperature 比 diameter 小，如此我們可預留些邊緣空間來磨光或架鏡。

於是我們可能更改的是 diameter，STO 的 thickness 來解決上述問題。先在 STO 的 diameter 上鍵入 14 來蓋過 12.5，此時會有一個“U”字出現代表 user define，現在設想我們要 edge thickness 固定為 3mm，可是你或許會問這樣系統豈不是弄亂了嗎？defocus 又會出現，關鍵是再一次執行 optimization 即可。在 STO 的 thickness 上按一下，選擇 Edge Thickness 項目，則會出現“Thickness”及“Radial Height”兩項，設 thickness 為 3 及 radial height 為 0(若 radial height 為 0，則 **Zemax** 就使定 user define 的 semi-thickness)按 OK 跳出，你會發現 STO 的 thickness 已改變，且會出現一個“E”字代表 an active thickness solve 在該項的 parameter 上。

既然 edge thickness 已改變，所以 focal length 也一定有些許變動，為了維持原有的 EFL，現在再執行 optimization 一次即可。現在我們想看看 off-axis 的 performance，從 system 的 Fields 中的 Field Data，選用 3 個 field 來作比較，怎麼選呢？在第 2 及第 3 個列中的“Use”項中各按一下，在第 2 列的 y field 行中鍵入 7(即 7 degree)，在第 3 列中鍵入 10，第一列則讓它為 0 即持續 on-axis。而設所有的 x field 皆為 0，對一個 rotational 對稱的系統而言，他們的值很小，按 OK 鍵跳出。現在 Update rayfan，你可看到如 Figure E2-4 之圖。圖中 T 代表 tangential，S 為 sagittal，結果顯示 off-axis 的 performance 很差，這是因為一開始我們就設計系統在 on-axis 上來作 optimization，這些 aberration 可以用 field curvature plot 來估計，選 Analysis 中，Miscellaneous 的 Field Curv/Dist。則出現如 Figure E2-5 的圖，左圖表示 shift in paraxial focus 為 field angle 的函數，而右圖為 real ray 的 distortion，以 paraxial ray 為參考 ray。在 field curvature plot 的訊息也可從 rayfans 中得知，為 field curvature plot 是正比於在 rayfan plot 中通過原點的斜率。

[\(回內容綱目\)](#)

●習作三：牛頓望遠鏡

你將學到：使用 mirrors，conic constants，coordinate breaks，three dimensional layouts，obscurations。

牛頓望遠鏡是最簡單的矯正所有 on-axis aberrations 的望眼鏡。牛頓望遠鏡是利用一個簡單的 parabolic mirror 完美地矯正所有 order 的 spherical aberration，因為我們只在 optical axis 上使用，除 spherical aberration 外並沒有其他的 aberration。

假想要設計一個 1000mm F/5 的望遠鏡，我們需要一個具有 2000mm 的 curvature 及 200mm 的 aperture。在 surface 1 即 STO 上的 curvature 項中鍵入 -2000 mm，負號表示對 object 而言，其曲面為 concave，即曲面對發光源而言是內彎的。在 thickness 項中鍵入 -1000，負路表示光線沒有透過 mirror 而是反射回來，在 Glass 項中鍵入 MIRROR，最後在 System 的 General 項中的 aperture 中鍵入 200。

Wavelength 選用 0.550，field angle 則為 0。現在看看 spot diagram，你會看到一個 77.6 microns RMS 的 spot diagram，而一個很方便估算 image quality 的方法就是在 spot diagram 的頂端上再 superimpose 一個 Airy diffraction ring。從 spot diagram 的 menu bar 選擇 Setting，在 Show Scale 上選 "Airy Disk"，結果如圖 Figure E3-1 所示，你會發現和選 "scale bar" 的結果是一樣的。圖中所列的 RMS spot size 選 "Airy Disk" 為 77.6 microns。光線並沒有 diffraction-limited 的原因是因為我們還沒有設定 conic constant。先前我們設定的 curvature 的值為 -2000 只是定義一個球面，若要定義一個拋物面鏡，則在 STO 的 Conic 項中尚需鍵入 -1，接下來 Update spot diagram，你會看到 "Airy ring" 為一個黑圈，而光線則聚集在圈內中心上，RMS 值為 0。

可惜的是，成像的位置很不好，所謂的不好是它位於在入射光的路徑上，若你要看這個像的話，你的觀看位置剛好擋住入射光。改善的方法是在反射鏡的後面再放一個折鏡，fold mirror(後面是相對於成像點而言)，這個 fold mirror 相對於光軸的傾斜角度為 45，把像往上提離光軸。因為進來的光束為 200mm 寬，因此成像平面至少在離光軸 100mm 的上方，如此"看"像的時候才不會擋住入射光。我們決定用 200mm，而 fold mirror 離先前的反射鏡面為 800mm，因為 $200+800=1000$ 等於原先在 STO 上的 thickness，即成像"距離"不變。操作如下，先把 STO 的 thickness 改為 -800，然後在 imagine plane 前插入一個 dummy surface，為何要插入 dummy surface 呢？又 dummy surface 是什麼呢？dummy surface 的目的只是在幫助我們把 fold mirror 的位置標示出來，本身並不具真實的光學鏡片意義，也不參予光學系統的任何"反應"，所以稱為 dummy surface。怎麼插入 dummy surface 呢？先在 image plane 前面插入一個 surface，這個 surface 很快地就會被轉變成 fold mirror，但是你不要自己在 surface type 處去改變它成為 fold mirror，而是選 Tools 中的 Add Fold Mirror，並在其 "fold surface" 處選 "2" 代表定義 surface 2 為 fold mirror，完成後你將看到如 **Zemax** P.31 頁中 LED 的表。或許你會問，表中 surface type 處在 surface 2 及 4 中皆為 Coord Break，這又是什麼？coordinate break surface 是在目前的系統內定義一個新座標系統，它總是用 dummy surface 的觀念用來作 ray tracing 的目的。而在描述此新座標系統中，通常選用 6 個不同參數，即 x-decenter, y-decenter, tiltx, tilty, tiltz 及一個 flag 來指示 tilting 或 decentration 的 order。

要注意的是，coordinate break 總是相對於 "current" 而 "global" 的 coordinate system，即只是在一個系統內部，若要改變某樣物件的位置或方向，我們即利用 coordinate break 來作此物件的區域調整，而不用重新改變所有的系統各部份。Coordinate break 就像是一個平面指向調整後的局部系統的方位。然而 coordinate break surface 絕不會顯示出來。而它的 glass 項中顯示為 "-" 代表不能鍵入，而它的 surface type 型式一定跟它前一面鏡的 glass type 一致。現在我們來看看 layout，不能選 2D(2D 只能看 rotational symmetric systems)，要用 3D 看，叫出 layout 後，按 $\uparrow\downarrow$ 或 page down or up 可以看立體效果，這個設計尚可再作改善，首先入射光打到 fold mirror 背後的部份可以 vignettted，這在實際的系統中是一個很重要的思量。在 STO 的前面插入一個 surface，令這個 surface 的 thickness 為 900，在 surface type 中的 Aperture Type 還為 "Circular Obscuration"，在 Max Radius 鍵入 40，因為 fold mirror 的 semi-diameter 為 31，如此才能遮蔽。Update 3D layout，如看不到像 Figure E3-3 的圖，則在 3D layout 的 setting 項中改變 the first surface 和 the last surface 分別為 1 及 6 即可。

(回內容綱目)

●習作四：Schmidt-Cassegrain 和 aspheric corrector

你將學到:使用 polynomial aspheric surface, obscurations, apertures, solves, optimization, layouts, MTF plots.

本習作是完成 Schmidt-Cassegrain 及 polynomial aspheric corrector plate。這個設計是要在可見光譜中使用。我們要一個 10inches 的 aperture 和 10inches 的 back focus。開始設計之初，先把 primary corrector System, General, 在 aperture value 中鍵入 10，同在一個 screen 把 unit"Millimeters"改為"Inches"。再來把 Wavelength 設為 3 個,分別為 0.486,0.587,0.656,0.587 定為 primary wavelength, 你可以在 wavelength 的 screen 中按底部的"select"鍵，即可完成所有動作。目前我們將使用 default 的 field angle value，其值為 0。依序鍵入如 **Zemax** P.33 頁的 starting prescription for schmidt cassegrain 的 LDE 表,此時 the primary corrector 為 MIRROR 球鏡片。你可以叫出 2D layout,呈現出如 Figure E4-1 之圖。現在我們在加入第二個 corrector，並且決定 imagine plane 的位置。鍵入如 **Zemax** P.33 Intermediate prescription for schmidt cassegrain 的 LDE，注意到 primary corrector 的 thickness 變為 -18,比原先的-30 小,這是因為要放 second corrector 並考慮到其 size 大小的因素。在 surface4 的 radius 設定為 variable，透過 optimization, **Zemax** 可以定下他的值。先看看他的 layout，應如 Figure E4-2 所示。叫出 merit function, reset 後,改變"Rings" option 到 5。The rings option 決定光線的 sampling density, default value 為 3,在此設計,我們要求他為 5。執行 optimization, 用 Automatic 即可,你會發現 merit function 的值為 1.3,不是很理想。這是 residual RMS wave error 所致。跳出 merit function,從 system 中選 Update All,則 secondary corrector 的 radius 已變成 41.83。從 Analysis, fans,中選 Optical Path, OPD plot 如 Figure E4-3 所示,發現其為 defocus 且為 spherical,大概約有 4 個 wave aberration 需要矯正。

現在切入另一個主題，利用指定 polynomial aspheric coefficients 來作 aspheric correction。改變 surface 1 的 surface type 從 standard 改為"Even Asphere"，按 OK 後跳出，回到 surface 1 列中，往右移直到 4th Order Term, 把此項設為變數, 依法炮製, 6th, 8th,後再次執行 optimization。把 OPD plot update,其圖應如 Figure E4-4 所示,你會發現 spherical aberration 已被大大地減少。小心一點的觀察,不同的三個波長其相對的 aberration 有不同的 spherical amount, 這就是 spherichromatism,是下一個要矯正的目標。依據經驗所得,我們要用 axial color 來矯正 spherochromatism,何謂 axial color balance 呢?而實際上 spherochromatism 是在 first order axial color 中被忽略的 higher order 效應。而現在 first order axial color 並不存在,如果 first order 存在的話,代表其效應(首先 axial color 既是指軸而言,他即表示 paraxial-optics,即不同 color 在軸上的效應,也就是 first order optics)要遠大於 higher order, 即 higher order 的 aberration 會被 balance 掉,即 first order 會搶 higher order 的 aberration, 用 first order axial color 來消除 higher order 的 spherochromatism 這是在光學設計上常用的手法。

要怎麼引進 axial color 呢?我們改變 surface1 的 curvature 來達到 axial color 的效果。把曲面 1 的 radius 設為 variable,執行 optimization, 再看看 update 後 OPD plot 圖,如圖 E4-5 所示,這就是我們所要設計的,殘餘的像差, residual aberration 小於 1/20 波長,這個良好結果,可以讓我們些微改變 field angle,從 system, field 中,把 field angle 的值設為 3 個,分別是 0.0, 0.3, 0.5。現在 field angle 已改變,

等於 boundary condition 已改變，所以你需要重定你的 merit function。把 merit function 的”Rings”改變為”4”後跳出執行 optimization，則新的 OPD plot 應如圖 E4-6 所示，雖有不同的 field angle,但是所有的 aberrations 卻可以接受。說明此設計還不錯。

假想我們要用此望遠鏡來照相，則這組望遠鏡的鑑別轉換功效為何？什麼是鑑別轉換功效 (Modulation Transfer Function) 呢？這就是說，若是發光物 Object 的鑑別率為 M_0 ，而經過此望遠鏡後所得到的鑑別率是 M_i ，則 $MTF = M_i / M_0$ 即 MTF 愈大，代表此望遠鏡較不會降低原有的鑑別率，也就比較不會失真。而 MTF 的橫軸為 spatial frequency in cycles per millimeter, spatial 為鑑別尺 (bar target) 明暗條紋中其分隔空間寬度之意，通常以 millimeter 為單位，而 frequency in cycles 即每 millimeter 有幾組明暗條紋，所以可鑑別最小刻度，即反應該光波的頻率。Modulation Transfer Function，即呈現如圖 E4-7 所示之圖，而 tangential & sagittal 對各種入射光 field angle 的 response 也一併顯示。

對一個有經驗的設計者而言，此設計所呈現的 MTF 為 circular pupil autocorrelation 的結果。這是我們尚未考慮 the secondary corrector 所帶來遮蔽效應。既然 secondary corrector 放在 primary 的前面中心位置上，則入射光一定有部分被擋住，並且在 primary 上有個洞把成像的光放出去，此洞也需納入考量，所以我們高估了我們的 performance。改良如下，回到 LDE，在曲面 3 的第一項中點兩下，從 Aperture types 中選 Circular Aperture，在 Min Radius 中鍵入 1.7，即入射光離光軸的半徑需大於 1.7 才可進入，此動作再處理 primary 上的洞，同時把 Max Radius 改為 6。再來處理 secondary corrector 的 obscuration，在 surface 3 的前面，插入一個 surface 這個 new surface 就變成了 surface 3，把其 thickness 改為 20，且 surface 2 的 thickness 改為 40，如此 $20+40 = 60$ 並不改變光從 BK7 後到 primary 的長度。調整 surface 3 的 Aperture type，設定為 Circular Obscuration。把 Max Radius 訂為 2.5，按 OK 後跳出，同時設定 surface 3 的 semi-diameter 也是 2.5，update 後的 MTF，你會發現 performance 已降低，特別是在 medial spatial frequencies 部分。

[\(回內容綱目\)](#)

●習作五：multi-configuration laser beam expander

你將學到：使用 multi-configuration capability。

假設你需要設計一個在波長 $\lambda = 1.053\mu$ 下操作的 laser beam expander, Input diameter 為 100mm, 而 output diameter 為 20mm，且 Input 和 output 皆為 collimated。在此設計之前，我們必須遵守下列設計條件，

1. 只能使用 2 個鏡片
2. 本設計在形式上必須是 Galilean (沒有 internal focus)

3. 只有一個 aspheric surface 可以使用
4. 此光學系統必須在 $\lambda 328\mu$ 下完成測試。

本設計任務不只要矯正 aberration 而已，而是在兩個不同 wavelengths 的情況下都要做到。先談條件 2 中什麼是 Galilean 呢？Galilean 就是光線從入射到離開光學系統，在光學系統內部不能有 focus 現象，在本例中即 beams 在兩個鏡片之間不能有 focus。好在本系統不是同時在 2 個 wavelengths 下操作，所以在操作時我們可以變動某些 conjugates。現在開始設計，依據 Zemax P.4-18 頁的 LDE 表中鍵入各 surface 的相關值。其中 surface 5 的 surface type 從 Standard 改為 Paraxial，這時在鏡片後面的 focal length 項才會出現。注意到使用 paraxial lens 的目的是把 collimated light (平行光) 給 focus。同時把 surface 5 的 thickness 及 focal length 皆設為 25, entrance pupil 的 diameter 定為 100, wavelength 只選一個 1.053 microns 即可，記住不要在設第二個 wavelength。叫出 merit function，在第 1 列中把 operand type 改為 REAY 這表示 real ray Y 將用來作為一種 constraint，在本設計中，我們被要求 Input diameter 為 100 而 output diameter 為 20，其比值為 $100 : 20 = 5 : 1$ ，即入射 beam 被壓縮了 5 倍，在 srf# 中鍵入 5，表示在 surface 中我們要控制他的 ray height，而 Py 上則鍵入 1.00。把 target value 定為 10，這個動作將會給我們一個 diameter collimated 為 20mm 的 output beam。為什麼呢？因為 Py 是 normalized 的 pupil coordinate，即入射光的 semi-diameter 為 50，Py = 1 即現在的入射光 is aimed to the top of the entrance pupil，把 target value 定為 10，就是輸出光的 semi-diameter 為 10，所以 $50 : 10 = 5 : 1$ ，光被壓縮了 5 倍，達到我們的要求。semi-diameter 的值定為 10，現在選 Tools, Update，你會看到在 value column 上出現 50 的值，這就是 entrance pupil radius 即表示 coordinates 是座落在一個單位圓 (unit circle) 上，而其半徑為 50，當 Px = 0, Py = 1 即表示在 y 軸的 pupil 大小為 50，而在 x 軸的則為 0。

從 edit menu bar 選 Tools, Default Merit Function，按 Reset 後把 "Start At" field 的值改為 2，這表示以後的 operands 會從第二列開始，而不會影響已建立的 REAY operand。執行 optimization 後，把 OPD plot 叫出來，如圖 E5-1 所示，你會發現 performance 很差，大約為 7 個 waves。

這個 aberration 主要來自 spherical aberration，所以我們要把 surface 1 改為 a spheric，把 surface 1 列中的 conic 設為 variable，再次執行 optimization，你會看到較好的 OPD plot。現在把所有的 variable 都去掉，然後將此 field 存檔，因為你已完成 wavelength 在 1.053μ 下的 beam expander 設計。但是 wavelength 在 0.6328μ 的情況怎麼辦呢？我們進入此習作的另一個主題，也就是 multi-configuration 可以在同一系統中同時設定不同的 configuration，以適應不同的工作環境或要求，先前我們已完成了 wavelength 為 1.053μ 的 configuration，把他看做 configuration 1，而 wavelength 0.6328μ 為 configuration 2。

把 wavelength 從 1.053 改為 0.6328 後看看 OPD plot，出現非常差的 performance，這是因為 glass dispersion 的緣故。我們調整 lens spacing 來消除此 defocus 把 surface 2 的 thickness 設為 variable，執行 optimization 後，update OPD plot，此時的 aberration 大約為一個 wave，接下來消掉 surface 2

thickness 的 variable。現在我們來使用 **Zemax** 的 multi-configuration capability 功能，從 main menu 上選 Editors，後 Multi-configuration，再選其中的 Edit，Insert Config，如此我們就可以加入一個新的 configuration，在第一列的第一項中按兩下，選"wave"，同時在"Wavelength#"中選為 1，這表示在不同的 configuration，我們使用不同的 wavelengths。在 Config 1 下鍵入 1.053，Config 2 下鍵入 0.6328，在插入一個新的列於此列的第一項中按兩下，選 THIC 為一個 operand type，這會讓我們在各別的 configuration 中定義不同的 thickness，從"surface" list 中選 2 後按 OK。在 Config 1 下鍵入 250，Config 2 也鍵入 250，不過在 surface 中選 2 即表示在 LDE 中 surface 2 的 thickness 是當作 multi-configuration 的一項 operand value，把 Config 2 下 surface 2 的 thickness 設為 variable。回到 merit function editor，選 Tools，Default Merit Function，把"StartAt"的值改為 1，使 default merit function 會從第一列開始考慮。現在先前設定的 REAY constraint 條件必須加到此新的 multi-config merit function，在 merit function 的第一列中，有一個 CONFoperand 且在"Cfg#"項中定為 1，表示現在 configuration 1 是 active。在此列之下尚有三個 OPDXoperands，於 CONF 和第一個 OPDX 之間插入一個新列，把其 operand type 改為"REAY"，"Srf#"鍵入 5。表示我們要控制的 ray height 是對 surface 5 而言，Py 鍵入 1.00target value 設為 10。如同先前的 file 讓輸出 beam 的 diameter 為 20mm。在 CONF 1 的要求接設定完畢，在 CONF 2 則不設任何 operand，因為我們不可能在兩種 wavelengths 操作下要求 exact 5:1 的 beam。回到 LED，把 surface 1，2，4 的 curvatures 及 surface 1 的 conic 皆設為 variable，執行 optimization（現在有 5 個 variable 為 active，3 個 curvatures，1 個 conic，1 個 multi-config thickness）。叫出 update 的 OPD plot，你可以在 multi-configuration editor 上在"Config 1"或"Config 2"上按兩下，則 OPD plot 會顯示其對應的 configuration，或者你可用 Ctrl-A 的 hot key，在不同的 configuration 間作變換，你會發現兩者的 performance 都很好，表示我們所設計的系統在 wavelength 1.053 或 0.6328 μ 的 laser 之下皆可以工作。

[\(回內容綱目\)](#)

●習作六：fold mirrors 和 coordinate breaks

你將學到：瞭解 coordinate breaks, sign conventions 在調整傾斜度，或改變系統中心的作用和如何裝置 fold mirrors 等，本習作的大部分技巧在"Add Fold Mirror"工具中可自動執行，然而瞭解實際的操作內容和細節，才是本習作的目的。

在習作 3 時或許你已學會如何設計 Newtonian 望遠鏡，其中已經有 coordinate breaks 的操作，以及光在經過 mirror 反射後 thickness 虛設定為負值，和 coordinate breaks 需伴隨著一對使用，而把要的 fold mirror 如三明治般地夾在其中。本習作將教你如何如何在一個簡單的 converging beam 中 manually 加入 fold mirrors，而不使用 Tools 中的"Add Fold Mirror"功能。

叫出 LDE，把 STO 的 surface type 改為 paraxial，thickness 定為 100，這時對 paraxial lens 的 default focal length 值，然後從 System, General，中把 aperture 設為 20，即產生一個 F/5 的 lens。完畢後看看 3D layout，一個簡單的 paraxial lens 所造成 converging beam 的光學系統已完成。假設我們要把輸出的 converging beam 導向上，怎麼作呢？那就是加入一個 fold mirror，先假定此 fold mirror 為

45° oriented 且具 paraxial lens 為 30mm。總共需要 3 個鏡片。一個為 coordinate break 把 coordinate system 轉 45°，然後一個 mirror 來反射光線，最後再一個 coordinate break 把反射後的 beam 給轉 45° 這是很重要的一點，共要 3 個 surface 來裝置一個 fold mirror。coordinate breaks 本身沒什麼作用，只是把入射光和輸出光作同樣的傾斜或改變中心座標的動作而已。在 imaging surface 前面出入 3 個 lens，把 surface 1 的 thickness 定為 30，在 surface 3 的 glass fold mirror 尚未 titled，所以系統會在 paraxial lens 的左邊 40mm 處 focus。更改 surface 2 及 4 的 surface type 為 Coordinate Brek，回到 LDE 往右一，在 surface 4 的第 3 個 parameter column 中期 heading 上頭標示為"Title About X"。在此項中按兩下，選"Pick Up"，且設定"From Surface"為 2，"Scale Factor"為 1.0，這代表 surface 4 的 coordinate break 動作會跟 surface 2 的一樣。移由標到 surface 2 的"Title about x"項中，鍵入 45，Update layout 你會看到如 Figure E6-1 的圖。注意到 coordinate break 的 thickness 為 0，表示 mirror 和 coordinate break surface 是重合的。應該注意的是，mirror 本身並沒有轉，轉的是入射前合入射後的座標系統，在反射後除了轉 45°外，並且移了-70units 去 focus，所有的 tilt 或 decenter 動作總是在光線跑，即 thickness 之前完成。現在再裝第二個 fold mirror，同樣在 imagine surface 前面插入 3 個 surface，把 surface 4 的 thickness 從-70 改為-30，在 surface 5 的 tilt about x 項鍵入-45，目的是在把光的進行方向還原到平行於原始入射方向，而 surface 7 的 tilt about x 項一樣選擇 pick up from surface 5 且 scale factor 定為 1。

Update 3D layout，則呈現如 Figure E6-2 的圖，如我們期待的，+45 和-45 互相抵消，輸出光平行於入射光，又要改變兩組的 coordinate breaks 的參數，只要改變 surface 2 及 5 即可。因為 surface 4 及 7 會各別依隨他們變動而變動。

[\(回內容綱目\)](#)

●習作七：使用 Extra Date Editor, Optimization with Binary Surfaces

或許你不會相信，會有"achromatic singlet"這樣的東西。當然，mirror 是一個 achromatic singlet，姑且不論之，去設計一個矯正到 first-order chromatic aberration 混合 refractive/diffractive 成分是不可能的。其中的技巧就是使用一個傳統 refractive singlet，然後將其中的一面蝕刻成一個 diffractive surface。此 singlet 造成很大的 focusing power，而 the weak diffractive component 則提供足夠的 dispersion 來補償 glass 的 dispersion。讓我們來回顧一些概念，一個 focal length f 的 singlet 其 optical power 為 $\phi = f^{-1}$ ，在 $\lambda_F - \lambda_C$ 的波長範圍下，power 的變異部分可由 singlet 其 glass 的 Abbe number V 來描述，其中 λ_F 及 λ_C 為 hydrogen 的 F 及 C line 的 wavelength 依序為 0.4861 μm 和 0.6563 μm 。故

$$\Delta\phi = \phi/V$$

在大部分的 glasses 種類中，他們的 dispersion 都很小，如 BK7 來說，其 V 值為 64.2。而 $\Delta\phi$ 大約為整體的 2%。

而 Diffractive optics 則直接使用 phase of wavefront 操作來增加光數的 optical power。對一個具有 quadratic phase profile 的 diffractive surface，其 phase 為

$$\psi = Ar^2$$

A 為每平方單位長度的弧度量，而 r 為 radial coordinate。如此的 diffractive surface，他的 power 為

$$\phi = \lambda A/\pi$$

和他所承受的波長呈線性相關。在同樣的波長範圍下，refractive singlet 的 power 變異為 2%，而 diffractive optic power 則幾乎為 40%，此外，dispersion 的正負號可由 A 的正負號來決定。這有什麼好處呢？如果我們在 refractive 部分增加一些 positive power，同時可由在 diffractive 部分增加一些 negative power 來達到補償的效果。所增的 power 量可以從"Standard"改為"Binary 2"。然後在 IMA 前面加入一個新的 surface，即插入 surface 2，其 thickness 設為 100。STO 的 thickness 設為 10，glass 選為 BK7，從 System，General 中 Aperture Value 定為 20。Wavelengths 選 0.486，0.587 及 0.656，選 0.587 定為 primary。首先我們看一個 convex-plano singlet 的 performance，把 surface 1 的 radius 設為 variable，且從 Merit Function Editor 的 tools 中使用 Default Merit Function。子行 Optimization，叫出 OPD plot，你會發現其 aberration 約為 8 個 waves。除了 axial color 主宰此設計外，spherical aberration 和 default 也相當可觀。

現在改良此設計，從 Editors，Extra Data 中在"Max Term"項上鍵入 1 和"Norm Aper"上鍵入 10，而"Coeff on PA2"此項則設為變數。然後執行 Optimization，其中有兩項變數，分別是 surface 1 的 radius 及 diffractive power。Update OPD plot 則 maximum aberration 已經降至約一個 wave，造成 aberration 的主要原因只剩下 secondary spectrum 及 spherical aberration。我們利用 higher order term 的技巧來矯正他，回到 Extra Date Editor，把"MaxTerm #"改為 2，且社 fourth order term 項為 variable，再次執行 optimization。叫出 updated 後的 OPD plot，你會發現 wavefront aberration 已大大降至 1 個 wave 以下。

[\(回內容綱目\)](#)